

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 528.88

ТРЕБОВАНИЯ К ДЕТЕКТОРУ МОЛНИЙ, РАЗМЕЩАЕМОМУ НА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

А. А. Асташкин, А. В. Карелин, Ю. А. Кузьмин, К. А. Молодцов,
В. А. Шувалов, К. С. Щербатых, А. А. Яковлев

Приводится обзор космических средств мониторинга грозовой активности для разрядов внутриоблачных и «облако – земля». Изучение пространственного распределения плотности молниевых разрядов и их интенсивности является важным для широкого спектра научных и прикладных задач, включая совершенствование существующих прогностических климатических моделей и исследования механизма поддержания и разгона тропических ураганов, торнадо и смерчей. Проанализированы технические характеристики существующих и перспективных детекторов молний на низких околоземных и геостационарных орбитах. На основе анализа и проведенных расчетных оценок сформулированы основные требования к перспективным детекторам молний, которые планируется разместить на малых космических аппаратах на низких околоземных орбитах. Подчеркивается важность использования высокоскоростных широкоформатных фотоприемников и узкополосных светофильтров.

Ключевые слова: молниевая активность, дистанционное зондирование Земли, детектор молний, низкая околоземная орбита, малые космические аппараты.

Введение

Среди всех видов атмосферных электрических разрядов разряды, порождаемые грозowymi кучево-дождевыми облаками, представляют наибольший научный и прикладной интерес. Это связано с тем, что молнии ежегодно наносят значительный материальный ущерб (лесные пожары, повреждение электрической инфраструктуры). В среднем по всей России на долю лесных пожаров, вызываемых молниями, приходится от 10 до 15 % от общего числа пожаров [1, 2], а для отдельных районов Сибири – от 70 до 90 % [2 – 4]. Грозовая активность кучево-дождевых облаков также является составной частью механизма поддержания и разгона тропических ураганов, торнадо и смерчей [5 – 10].

В работе [11] отмечается, что по мере повышения температуры у земной поверхности и в нижней тропосфере на один градус во всем Заполярье происходит увеличение частоты молний примерно на 40% в тундре и на 25% в тайге. Также молнии являются одним из основных источников окислов азота (NO_x) в атмосфере, которые приводят к увеличению содержания озона (O_3), гидроксильных радикалов (HO_x) [12]. Таким образом, формируются связи между молниевой активностью и химическим составом атмосферы, ее температурой и интенсивностью конвективных процессов [12].

Образование кучево-дождевого облака сопровождается падением давления, что интенсифицирует воздухообмен почва – атмосфера и повышает выход в приповерхностную атмосферу радона, основного ионизатора приземного воздуха, что, в конечном итоге, приводит к высокой частоте поражаемости этой территории молниями [13, 14]. Это необходимо учитывать, в частности, для обеспечения безопасной эксплуатации подземных газовых хранилищ.

С помощью наземных средств достаточно эффективно регистрируются молниевые разряды «земля – облако», но для разрядов «облако – облако» чувствительности данных средств недостаточно, поэтому с целью построения полной картины глобальной молниевой активности необходимо использовать космические средства [15]. Кроме того, космические средства позволяют обеспечить высокую плотность наблюдений в тех районах, которые не охватываются наземными средствами, например, океаны и труднодоступные местности.

Изучение пространственного распределения плотности молниевых разрядов и их интенсивности позволяет совершенствовать существующие прогностические климатические модели [16, 17].

Целью настоящей работы является разработка тактико-технических требований к детектору молний для его размещения на малых космических аппаратах и создания орбитальной группировки для глобального мониторинга грозовой активности.

Существующие и перспективные космические средства мониторинга грозовой активности

В настоящее время за рубежом накоплен обширный опыт эксплуатации космических средств мониторинга молний на низких и геостационарных орбитах.

Одним из первых детекторов мониторинга грозовой активности является американский прибор Optical Transient Detector (OTD) в составе космического аппарата (КА) OrbView-1 (MicroLab-1), запущенного в 1995 году на низкую околоземную орбиту (НОО) высотой 740 км. Прибор позволял наблюдать как внутриоблачные разряды, так и раз-

ряды «облако – земля» в дневное и ночное время с разрешением до 9 км. Однако обнаружение молний в дневное время на фоне яркого облачного покрова сильно усложняло обработку данных, отчего эффективность обнаружения составляла порядка 50%. «Вспышки» определялись путем сравнения яркости соседних кадров оптических данных ОТД. Если разница превышает заданное пороговое значение, то регистрируется «событие» [18 – 20]. Более подробные характеристики ОТД приведены в таблице.

Другим известным регистратором молний является американский прибор Lightning Imaging Sensor (LIS) на НОО высотой 350 км в составе комплекса целевой аппаратуры (ЦА) КА TRMM, запущенного на орбиту в 1997 году. В 2001 году с целью продлить срок службы КА высота была изменена до 402,5 км, что позволило КА проработать на орбите до 2015 года. LIS давал обнаруживать в дневное и ночное время внутриоблачные и разряды «облако – земля» с разрешением до 5 км. Полученные с LIS данные дали возможность исследовать связи грозовой активности с динамикой развития тропических циклонов и ионосферными процессами, а также существенно улучшить климатические модели [17, 21, 22]. Более подробные характеристики LIS приведены в таблице.

В настоящее время детекторы молний (ДМ) стали размещать на геостационарных КА гидрометеорологического обеспечения: GOES-16 (США), FY-4A (Китай), MTG-I1 (Европа). Основными преимуществами расположения ДМ на геостационарной орбите (ГСО) являются большое поле зрения приборов и высокая периодичность съемки.

Мониторинг грозовой активности на КА GOES-16, запуск которого состоялся в 2016 году, осуществляется с помощью прибора Geostationary Lightning Mapper (GLM). Поле зрения прибора GLM образовано одним оптическим каналом и определяется матрицей формата 1372×1300 пикселей и оптикой с полем зрения с границами в 59° от точки надир и с узкополосным интерференционным фильтром с полосой пропускания 1 нм [23]. Проекция пикселя в подспутниковой точке соответствует 8 км, и при равномерном шаге матрицы на широте 45° она соответствовала бы уже 14 км, поэтому для матрицы был выбран переменный шаг, что позволило достичь разрешения в 10 км [24]. Специально разработанная ПЗС-матрица с переменным шагом пикселей обеспечивает близкое к равномерному разрешение в поле зрения прибора [25]. Остальные характеристики GLM перечислены в таблице.

Регистрирующий молнии прибор Lightning Mapper Imager (LMI) на борту КА FY-4A, запу-

щенного в 2016 году в точку стояния $99,5^\circ$ в.д., включает две камеры и в совокупности покрывает всю территорию Китая. Фотоприемная матрица камеры имеет формат 400×300 пикселей. Проекция пикселя в подспутниковой точке составляет 7,8 км [26]. Другие основные характеристики представлены в таблице.

Прибор мониторинга грозовой активности Lightning Imager (LI), размещенный на КА MTG-I1, был запущен на орбиту в 2022 году и представляет собой четыре камеры с полем обзора $8,7^\circ \times 8,7^\circ$ каждая, оптические оси которых отклоняются от оси прибора, направленной в подспутниковую точку, на $4,75^\circ$ к северу, югу, западу и востоку (рис. 1). В фокальных плоскостях объективов расположены фотоприемные КМОП-матрицы формата 1170×1000 пикселей, которые являются более высокоскоростными в сравнении с ПЗС-матрицами и позволяют достичь кадровой частоты до 1000 Гц, а также позволяют отказаться от аналого-цифрового прибора в виде отдельной ячейки [27 – 29].

Высокая периодичность наблюдения также достигается размещением ДМ на многоспутниковых орбитальных группировках на основе малых КА (МКА). Примером использования МКА для регистрации молниевой активности является МКА типа CubeSat FireFly размерностью 3U, который был выведен на орбиту высотой 500 км в 2013 году и проработал до 2017 года с учетом максимального срока активного существования (САС) 1 год. Одна из основных задач этого МКА состояла в изучении взаимосвязи между молниями и земными гамма-вспышками, представляющих собой переходные энергетические всплески в верхних слоях атмосферы [31]. Прибор Optical Lightning Detector (OLD) позволяет регистрировать оптический сигнал разряда молний с частотой до 100000 кадров/с и представляет собой четыре перекрывающихся PIN-фотодиода, предназначенных для локализации молнии (рис. 2).

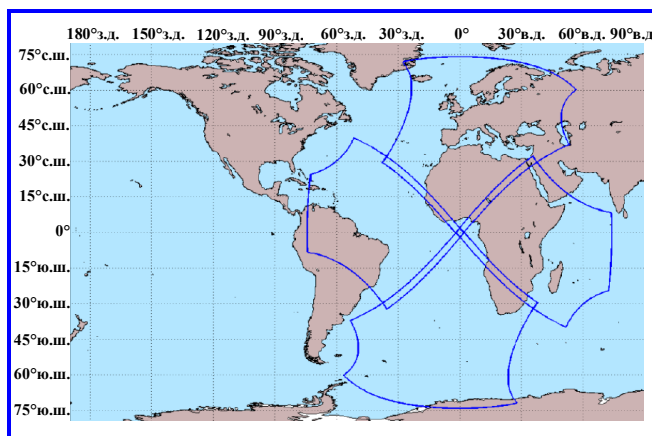


Рис. 1. Поле зрения (синие линии) LI в цилиндрической картографической проекции [30]

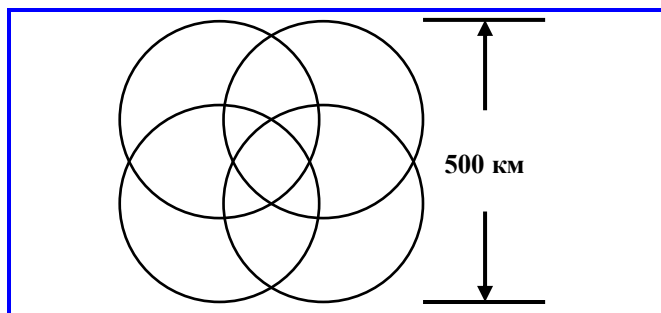


Рис. 2. Поле зрения прибора OLD [32]

Три фотодиода имеют широкополосные фильтры в видимом диапазоне, а четвертый – узкополосный (шириной порядка 5 нм) спектральный фильтр в диапазоне 777,4 нм. Каждый фотоприемник имеет угол обзора ± 22,5°, поэтому при высоте орбиты 500 км самая удаленная от надира наблюдаемая точка находится на расстоянии 541 км [32]. Другие основные характеристики представлены в таблице.

В ближайшие три года планируются запуски МКА CubeSpark и RaioSat типа CubeSat с ДМ на борту. МКА CubeSpark предназначен для картирования молниевой активности из космоса на НОО,

в состав ЦА которого входит прибор CubeSat Lightning Imaging and Detection Experiment (CLIDE). CLIDE представляет собой оптическое устройство с КМОП-матрицей, позволяющее наблюдать за молниевыми вспышками в двух спектральных диапазонах: 777,4 нм и 337,0 нм для улучшения обнаружения вспышек, в частности стримерных процессов (нити электрических разрядов, представляющие собой хорошо проводящие каналы). Кроме того, МКА CubeSpark использует новую стратегию обнаружения молниевых разрядов на основе искусственного интеллекта и динамической выборки [33].

МКА RaioSat размерности 3U предназначен для обнаружения внутриоблачных разрядов и разрядов «облако – земля» на НОО. В состав ЦА входит камера с матрицей формата 2048 × 1536 пикселей, которая должна обеспечивать пространственное разрешение порядка 80 м/пиксель с высоты 650 км в спектральном диапазоне от 700 до 900 нм с использованием узкополосных фильтров в спектральных диапазонах 777,4 нм и 868,7 нм (линия атомарного азота) для увеличения эффективности обнаружения молний [33]. Другие основные характеристики представлены в таблице.

Таблица

Сравнение технических характеристик существующих и перспективных детекторов молний на низкой околоземной и геостационарной орбитах

Параметр	OTD [18 – 20] (OrbView-1)	LIS [17, 21, 22] (TRMM)	OLD [31, 32] (FireFly 3U cubesat)	GLM [23 – 25] (GOES-16)	LMI [26] (FY-4A)	LI [27 – 29] (MTG-II)	CLIDE [33] (CubeSpark)	RaioSat [34] (3U cubesat)
Страна, год запуска	США, 1995	США, 1997	США, 2013	США, 2016	Китай, 2016	ЕС, 2022	США, запланирован	Бразилия, запланирован
Высота орбиты спутника, км	740	350	500	35786	35786	35786	550	650
Наклонение орбиты, °	70	35	40,5	0	0	0	63	30
Поле обзора, °	75 × 75	80 × 80	22,5 × 22,5	8 × 8	7,8 × 7,8	16 × 16	60 × 60	–
Количество камер	1	1	4 PIN-фотодиода	1	2	4	1	1
Спектральный диапазон, нм	777,4	777,4	777,4	777,4	777,4	777,4	777,4; 337	777,4; 868,7
Формат фотоприемной матрицы	128 × 128 (ПЗС)	128 × 128 (ПЗС)	–	1300 × 1372 (ПЗС)	400 × 300 (две ПЗС-матрицы)	1170 × 1000 (КМОП)	– (КМОП)	2048 × 1536 (ПЗС)
Размер проекции пикселя на Землю, км	10	5	–	8	7,8	4,5	Не более 2,0	0,08
Частота кадров, с ⁻¹	500	500	до 100000	500	500	1000	Не менее 1000	500
Длительность кадра, мс	2	2	–	2	2	1	Не более 1	2
Разрядность аналого-цифрового преобразования	–	12	16	14	12	12	–	10
Эффективность обнаружения молний	50%	90%	–	Не менее 90%	Не менее 90%	Не менее 90%	–	–
Потребляемая мощность, Вт	25	25	–	290	–	300	–	–
Масса целевой аппаратуры, кг	20	25	Менее 2 кг	125	–	93	–	Менее 2 кг

Требования к пространственному разрешению

Процесс регистрации молний определяется прежде всего физикой процесса разрядов. Вспышка молнии при наблюдении из космоса представляет собой световое пятно на верхней границе облаков диаметром от 7 до 60 км. Чаше всего наблюдаются отблески порядка 10 км (рис. 3) [15, 23, 35 – 38]. Поэтому целесообразно, чтобы пространственное разрешение не превышало данной величины.

Требования к кадровой частоте съемки

Молниевый разряд состоит из множества световых импульсов, длительность которых не превышает 1 мс (рис. 4), поэтому кадровую частоту детектирования разряда стараются выбрать 1000 Гц и более [15, 36, 38]. В силу технических ограничений более ранние детекторы молний (OTD на КА OrbView-1, LIS (TRMM), GLM (GOES-16), LMI (FY-4A) и т.д.) имели кадровую частоту только 500 Гц. Время накопления, больше 1 мс, приводит к избыточному накоплению сигнала от фона – ярких облаков [15]. Поэтому кадровая частота съемки должна быть не менее 500 кадров/с, оптимальным значением является 1000 кадров/с.

Требования к спектральному диапазону

Наиболее интенсивной в молниевом разряде является эмиссионная линия атомарного кислорода, представляющая триплет с длинами волн 777,19, 777,42 и 777,54 нм (рис. 5), в связи с чем необходимо использование узкополосного светофильтра с шириной от 1 до 2 нм для выделения рабочего диапазона длин волн [15, 23, 35 – 38]. Стоит также отметить, что в данной спектральной полосе около 90% импульсов имеют интегральную энергетическую яркость более 4,7 мкДж·м⁻²·ср⁻¹ [17, 23, 35]. Это значение было принято в качестве основного для прибора LIS, установленного на космическом аппарате TRMM [17].

Требования к радиометрическому разрешению

Для оценки минимально необходимого радиометрического разрешения рассмотрим отношение фонового излучения, возникающего при отражении солнечного света от облаков, к световому импульсу. Предположим, что фоновое излучение соответствует ламбертовскому источнику, тогда его энергетическая яркость $L_s(\lambda, \theta_s)$ определяется следующим образом:

$$L_s(\lambda, \theta_s) = \frac{\rho E_s(\lambda) \cos \theta_s}{\pi}, \quad (1)$$

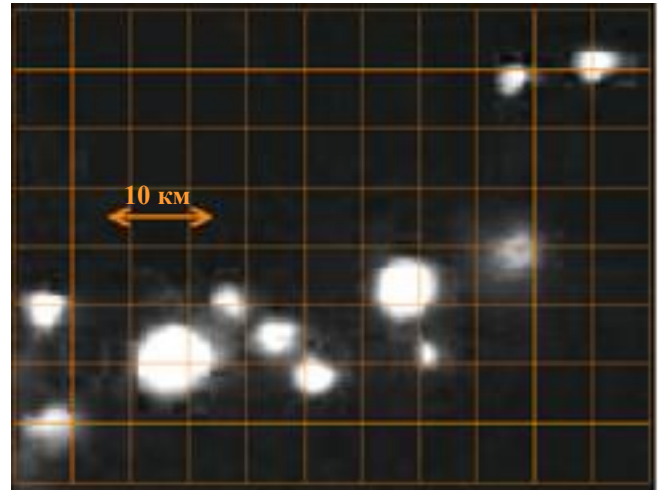


Рис. 3. Типовое световое пятно, создаваемое импульсом молнии на верхней поверхности облака [37]

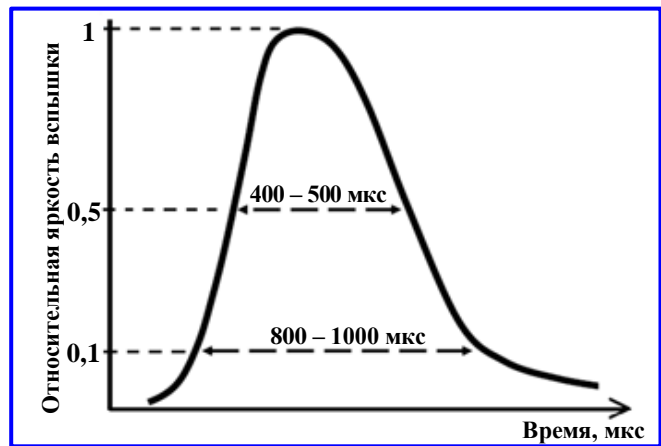


Рис. 4. Усредненная зависимость яркости импульса от времени по данным [38]. Длительность импульса по уровню 50% здесь составляет 400 – 500 мкс, а заключено в этом промежутке 75% излучённой энергии

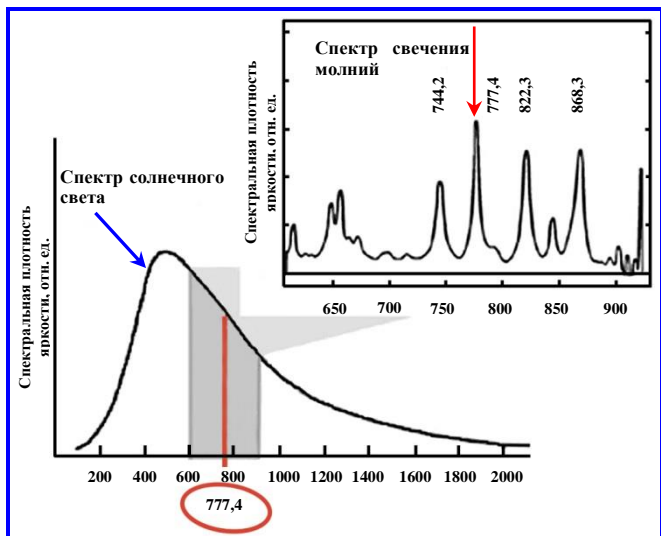


Рис. 5. Спектры свечения молний и Солнца [38]

где ρ – альbedo верхней границы облаков; θ_s – зенитный угол Солнца; $E_s(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической освещенности внешней границы атмосферы, рассчитываемая по формуле:

$$E_s(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_s}} - 1}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; λ – длина волны излучения; k – постоянная Больцмана; T_s – температура поверхности Солнца, как абсолютно черного тела.

С учетом спектральной плотности энергетической освещенности внешней границы атмосферы $E_s(\lambda)$ на длине волны $\lambda = 777,4$ нм, альbedo верхней границы облаков $\rho = 0,8$, временем накопления сигнала $\tau = 1$ мс, интегральной яркости молнии $L = 4$ мкДж·м⁻²·ср⁻¹ получаем, что при характерной ширине светофильтра $\Delta\lambda = 2$ нм и зенитном угле Солнца $\theta_s = 0^\circ$ число градаций сигнала должно быть не менее:

$$N = \frac{L_s(777,4 \text{ нм}, 0^\circ)\tau\Delta\lambda}{L} \approx 150.$$

Таким образом, если радиометрическое разрешение будет 9 бит, то световой импульс создает превышение над фоновым излучением примерно в 3,4 раза при наилучшей временной фазе и в 1,7 раз – при наихудшей ($\tau = 2$ мс). Данное значение можно принять за минимально необходимое.

С учетом ослабления излучения при прохождении через ионосферу и верхнюю границу атмосферы, а также для более качественного сбора данных яркостного распределения молний целесообразно увеличить радиометрическое разрешение до 10 – 12 бит [39]. В таком случае световой импульс превышает излучение фона в 3,4 - 13,7 раз для наихудшей временной фазы ($\tau = 2$ мс).

Требования к массе детектора молний

Развитие электронных средств, технологий, появление новых материалов позволяет сегодня значительно уменьшить массогабаритные и энергетические характеристики электронных систем, применяемых в космической технике, поэтому возникает насущная необходимость создания малых космических аппаратов. Особенно стоит отметить МКА типа CubeSat, использование которых позволяет значительно уменьшить срок разработки и стоимость КА. Ранее было отмечено, что суще-

ствует несколько зарубежных проектов по реализации МКА типа CubeSat с детектором молний на борту, однако для достижения этого необходимы ограничения на размеры и массу ЦА. Так, для МКА типа CubeSat размерностью 3U размер и масса ДМ не должны превышать 2U и 2 кг соответственно, а для МКА типа CubeSat размерности 16U – не более 12U и 10 кг [40].

Заключение

На основе приведенных оценок и тактико-технических характеристик (таблица) действующих и перспективных разработок ДМ можно сформулировать основные специальные требования к приборам мониторинга молниевой активности, которые могут быть размещены на МКА типа CubeSat размерности от 3U до 16U, расположенных на НОО:

1. Пространственное разрешение должно составлять не более 10 км.
2. Кадровая частота съемки должна быть не менее 500 кадров/с, оптимально 1000 кадров/с.
3. Измерения детектором молний должна осуществляться в спектральном диапазоне 777,4 нм.
4. Радиометрическое разрешение должно составлять 10 – 12 бит.
5. Размер и масса ДМ для МКА типа CubeSat размерности 3U должны составлять не более 2U и 2 кг соответственно, а для МКА типа CubeSat размерности 16U – не более 12U и 10 кг.

Для выполнения этих требований необходимо внедрять новые технологические достижения: использование высокоскоростных широкоформатных фотоприёмников (КМОП-матриц) совместно с бинированием пикселей и узкополосных светофильтров шириной от 1 до 2 нм для выделения рабочего спектрального диапазона.

Литература

1. Козлов, В. Н. Экологическая опасность лесных пожаров и методы ее предотвращения / В. Н. Козлов, А. П. Доронин, В. М. Петрученко // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 48. Научно-теоретический журнал. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2017. – С. 234–248.
2. Иванов, В. А. Пожары от гроз в лесах Сибири / В. А. Иванов, Г. А. Иванова. – Новосибирск : Наука, 2010. – 164 с.
3. Иванов, В. А. Пожары от молний в лесах Красноярского Приангарья / В. А. Иванов, Н. А. Коршунов, П. М. Матвеев. – Красноярск : СибГТУ, 2004. – 132 с.
4. Пономарев, Е. И. Спутниковые данные TOVS при решении задачи прогнозирования грозовой пожарной опасности в лесу / Е. И. Пономарев, В. А. Иванов, Н. А. Коршунов // География и природные ресурсы. – 2006. – № 1. – С. 147–150.

5. Боярчук, К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 204 с.
6. Karelin, A. V. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // *Physics of wave phenomena*. – 2006. – Vol. 14. – № 4. – P. 44–51.
7. Карелин, А. В. Механизм генерации электричества в грозных облаках и тропических ураганах / А. В. Карелин // *Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ*. – 2010. – Т. 118. – № 5. – С. 45–49.
8. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific / W. Zhang, Y. Zhang, D. Zheng [et al.]. – DOI : 10.1002/2014JD022334 // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2015. – Vol. 120. – Iss. 9. – P. 4072–4089.
9. Карелин, А. В. О связи интенсивности тропических ураганов с грозовой активностью. Взгляд из космоса / А. В. Карелин, В. В. Хегай // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. – 2021. – Т. 180. – № 1. – С. 26–32.
10. The Evolution of Lightning Flash Density, Flash Size, and Flash Energy During Hurricane Dorian's (2019) Intensification and Weakening / P. Duran, C. J. Schultz, E. C. Bruning [et al.]. – DOI : 10.1029/2020GL092067 // *Geophysical Research Letters*. – 2021.
11. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon / Y. Chen, D. M. Romps, J. T. Seeley [et al.]. – DOI : 10.1038/s41558-021-01011 // *Nature Climate Change*. – 2021. – Vol. 11 (5). – P. 404–410.
12. Коломеец, Л. И. Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы / Л. И. Коломеец, С. П. Смышляев // *Ученые записки РГГМУ*. – 2014. – Вып. 37. – С. 177–190.
13. Шулейкин, В. Н. Водород, метан, радон и молниевые разряды облако-земля / В. Н. Шулейкин. – DOI : 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art14 // *Актуальные проблемы нефти и газа*. – 2018. – Вып. 3 (22).
14. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere: New Concepts / S. Pulinet, D. Ouzounov, A. Karelin [et al.]. – Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2022. – DOI : 10.1007/978-94-024-2172-9.
15. Шарков, Е. А. Космический эксперимент «Конвергенция»: научные задачи, бортовая аппаратура, методики решения обратных задач / Е. А. Шарков, А. В. Кузьмин, S. Jeong. – DOI : 10.31857/S020596140002356-2 // *Исследование Земли из космоса*. – 2018. – № 4. – С. 71–96.
16. Finke, U. Detect and Locate Lightning Events from Geostationary Satellite Observations / U. Finke, O. Kreyer // *Report Part II: Feasibility of lightning location from a geostationary orbit*, № EUM/CO/02/1016/SAT; *Institute für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover*. – 2002. – URL : <https://studylib.net/doc/18778992/detect-and-locate-lightning-events-from-geostationary>.
17. Christian, H. J. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, S. J. Goodman // *NASA Technical Memorandum 4350*. – 1992. – URL : http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920010794_1992010794.pdf.
18. The Optical Transient Detector (OTD) / H. J. Christian, K. T. Driscoll, S. J. Goodman [et al.] // *Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Osaka, Japan, 1996. – P. 368–371.
19. Christian, H. J. Optical Detection of Lightning from Space / H. J. Christian // *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Guntersville, Alabama, 1999. – P. 715–718.
20. Diurnal Lightning Distribution as Observed by the Optical Transient Detector (OTD) / R. J. Blakeslee, K. T. Driscoll, D. E. Buechler [et al.] // *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Guntersville, Alabama, 1999. – P. 742–745.
21. The Lightning Imaging Sensor / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, S. J. Goodman [et al.] // *11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – 1999. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/19990108789>.
22. Global Lightning Observations. – 39 p. – URL : <http://sprg.ssl.berkeley.edu/atmos/tgf/UCB-TGF.pdf>. – Текст. Изображение : электронные.
23. GLM Lightning Cluster-Filter Algorithm / S. Goodman, D. Mach, W. Koshak [et al.]. – 2012. – 73 p. – URL : <https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/LCFA.pdf>. – Текст. Изображение : электронные.
24. Christian, H. J. The Need for Science-based Ground Processing Algorithms // *GLM Annual Science Team Meeting*. – Huntsville, Alabama, 2018. – URL : https://lightning.umd.edu/documents/glm/GLMScience2018/New%20Algorithms_Christian.pptx.
25. A novel CCD for application in high-frame rate geostationary space-based imaging / R. Bredthauer, K. Boggs, G. Bredthauer [et al.]. – DOI : 10.1117/12.925753 // *Proc. SPIE 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*. – 2012. – No. 84531N. – URL : https://www.researchgate.net/publication/258719592_A_Novel_CCD_for_Application_in_High_Frame_Rate_Geostationary_Space_Based_Imaging.
26. Cao, D. Development and Evaluation of detection algorithm for FY-4 Geostationary Lightning Imager (GLI) measurement / D. Cao, F. Huang, X. Qie // *XV International Conference on Atmospheric Electricity*. – Norman, Oklahoma, USA, 2014. – URL : http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Cao_59.pdf.
27. The Lightning Imager Feasibility for the Meteosat Third Generation / L. Tommasi, G. Basile, A. Romoli [et al.]. – DOI : 10.1117/12.2308211 // *Proceedings of the 6th ICSO (International Conference on Space Optics)*. – Noordwijk, Netherlands, 2006. – URL : <https://hdl.handle.net/20.500.14243/63723>.
28. The EUMETSAT Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Applications and Product Processing / J. Grandell, U. Finke, S. Gigli [et al.] // *9th EMS Conference*. – Toulouse, France, 2009. – 1 p. – URL : <https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2009/EMS2009-551.pdf>.
29. Dobber, M. Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) instrument on-ground and in-flight calibration / M. Dobber, S. Kox. – Darmstadt, Germany, 2016. – 31 p. – URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/1f48/6720b1461e66e5293bc198b685f9f0c51aa6.pdf>.
30. Grandell, J. Meteosat Third Generation (MTG): Lightning Imager and its products / J. Grandell ; EUMETSAT. – 2015. – URL : <https://resources.eumetrain.org/data/3/362/362.pdf>.

31. Layton, L. NSF/NASA Firefly CubeSat To Study Link Between Lightning And Terrestrial Gamma Ray Flashes / L. Layton // Spacemart. – 2008. – URL : <http://www.nasa.gov/topics/universe/features/firefly.html>.
32. The NSF Firefly CubeSat Mission: Rideshare Mission to Study Energetic Electrons Produced by Lightning / D. Rowland, J. Hill, P. Uribe [et al.] // 2011 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 5-12, 2011, paper: 2.0403. – DOI : 10.1109/AERO.2011.5747231. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/>.
33. An update on the CubeSpark 3D Lightning Mapping Concept / P. Gatlin, T. Lang, M. Quick [et al.] // 2022 GLM Annual Science Team Meeting. – Huntsville, AL, USA, 2022. – URL : https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220013897/downloads/CubeSpark_update_GLM_Science_Meeting_Sept2022.pdf.
34. CubeSat Development for Lightning Flashes Detection: RaioSat Project / A. C. Julio Filho, A. Tikami, E. S. F. De Paula [et al.] // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2020. – Vol. 1. – P. 80–93. – DOI : <https://doi.org/10.5028/jatm.cab.1161>.
35. Christian, H. J. Optical observations of lightning from a high altitude airplane / H. J. Christian, S. J. Goodman // Journal of Atmos. Oceanic Technol. – 1987. – Vol. 4. – P. 701–711.
36. Goodman, S. J. A Comparison of the Optical Pulse Characteristics of Intracloud and Cloud-to-Ground Lightning as Observed above Clouds / S. J. Goodman, H. J. Christian // Journal of Applied Meteorology. – 1988. – Vol. 27. – № 12. – P. 1369–1381.
37. Pohjola, H. Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Flash and Accumulated products and test data for user readiness activities / H. Pohjola, J. Grandell // Event Week on MTG-I satellite. – 2016. – URL : https://resources.eumetrain.org/data/4/433/Session_6.pdf.
38. Dobber, M. Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) instrument performance and calibration for user perspective / M. Dobber, J. Grandell // EUMETSAT. – 2014. – P. 1–13. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1088&context=calcon>.
39. Квитка, В. Е. Создание детектора молний для Международной космической станции / В. Е. Квитка, А. В. Корх // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – Т. 66. – № 1. – С. 42–49.
40. Разработка МКА типоразмера CubeSat – опыт МГТУ им. Н. Э. Баумана / Д. А. Рачкин, С. М. Тененбаум, В. Г. Мельникова [и др.] // К. Э. Циолковский и прогресс науки и техники в XXI веке. Материалы 56-х научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга. – 2021. – С. 24–27.

Поступила в редакцию 19.04.2024

Александр Алексеевич Асташкин, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 513-55-87, e-mail: Astashkin@tsniimash.ru.

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@tsniimash.ru.

Юрий Александрович Кузьмин, кандидат технических наук, начальник сектора, т. (495) 513-40-88, e-mail: KuzminYA@tsniimash.ru.

Кирилл Алексеевич Молодцов, инженер, т. (495) 513-40-88, e-mail: MolodtsovKA@tsniimash.ru.

Вячеслав Александрович Шувалов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 513-49-45, e-mail: ShuvalovVA@tsniimash.ru.

Константин Сергеевич Щербатых, инженер, т. (495) 513-48-61, e-mail: ShcherbatykhKS@tsniimash.ru.

Александр Александрович Яковлев, кандидат технических наук, заместитель начальника отделения, т. (495) 513-47-44, e-mail: AAYakovlev@tsniimash.ru.

(Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»).

REQUIREMENTS FOR A LIGHTNING IMAGER TO BE PLACED ON SMALL SPACECRAFT

A. A. Astashkin, A. V. Karelin, Yu. A. Kuzmin, K. A. Molodtsov, V. A. Shuvalov, K. S. Shcherbatykh, A. A. Yakovlev

An overview of space-based lightning activity detection instruments for intra-cloud and cloud-to-Earth discharges is provided. The study of the spatial distribution of the density of lightning flashes and their intensity is important for a wide variety of applications and in some areas of scientific research, including the improving existing predictive climate models and the understanding the mechanism of maintaining and dispersing tropical hurricanes and tornadoes. The technical characteristics of existing and prospective lightning imagers in low-Earth and geostationary orbits are analyzed. Based on the analysis and calculated evaluations, the basic requirements for a prospective lightning imager, which are supposed to be placed on small spacecraft in low-Earth orbits, are formulated. It is necessary to emphasize the importance of high-speed wide-format photodetectors and narrow-band filters.

Keywords: lightning activity, remote sensing, lightning detector, low Earth orbit, small spacecraft.

References

1. Kozlov V. N. Ecological danger of forest fires and methods of its prevention / V. N. Kozlov, A. P. Doronin, V. M. Petrochenko // Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University No. 48. Scientific and theoretical journal. – St. Petersburg : RGGMU, 2017. – P. 234–248.

2. Ivanov V. A. Fires from thunderstorms in the forests of Siberia / V. A. Ivanov, G. A. Ivanova. – Novosibirsk : Nauka, 2010. – 164 p.
3. Ivanov V. A. Fires from lightning in the forests of the Krasnoyarsk Angara region / V. A. Ivanov, N. A. Korshunov, P. M. Matveev. – Krasnoyarsk : SibSTU, 2004. – 132 p.
4. Ponomarev E. I. TOVS satellite data in solving the problem of forecasting thunderstorm fire danger in the forest / E. I. Ponomarev, V. A. Ivanov, N. A. Korshunov // *Geography and natural resources*. – 2006. – No. 1. – P. 147–150.
5. Boyarchuk K. A. Basic model of kinetics of ionized atmosphere / K. A. Boyarchuk, A. V. Karelin, R. V. Shirokov. – FSUE «NPP VNIIEМ», 2006. – 204 p.
6. Karelin A. V. Dynamics of tropical hurricanes and cyclones / A. V. Karelin // *Physics of wave phenomena*. – 2006. – Vol. 14. – No. 4. – P. 44–51.
7. Karelin A. V. The mechanism of electricity generation in thunderclouds and tropical hurricanes / A. V. Karelin // *Questions of electromechanics. Proceedings of NPP VNIIEМ*. – 2010. – Vol. 118. – No. 5. – P. 45–49.
8. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific / W. Zhang, Y. Zhang, D. Zheng [et al.]. – DOI : 10.1002/2014JD022334 // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2015. – Vol. 120. – Issue 9. – P. 4072–4089.
9. Karelin A. V. On the relationship between the intensity of tropical hurricanes and thunderstorm activity. A view from space / A. V. Karelin, V. V. Hegai // *Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEМ*. – 2021. – Vol. 180. – No. 1. – P. 26–32.
10. The Evolution of Lightning Flash Density, Flash Size, and Flash Energy During Hurricane Dorian's (2019) Intensification and Weakening / P. Duran, C. J. Schultz, E. C. Bruning [et al.]. – DOI : 10.1029/2020GL092067 // *Geophysical Research Letters*. – 2021.
11. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon / Y. Chen, D. M. Romps, J. T. Seeley [et al.]. – DOI : 10.1038/s41558-021-01011 // *Nature Climate Change*. – 2021. – Vol. 11 (5). – P. 404–410.
12. Kolomeets L. I. A model study of feedbacks between thunderstorm activity and atmospheric composition / L. I. Kolomeets, S. P. Smyshlyaev // *Scientific notes of RGGMU*. – 2014. – Issue 37. – P. 177–190.
13. Shuleikin V. N. Hydrogen, methane, radon and lightning discharges cloud-earth / V. N. Shuleikin. – DOI : 10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art14 // *Actual problems of oil and gas*. – 2018. – Issue 3 (22).
14. *Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere: New Concepts* / S. Pulinets, D. Ouzounov, A. Karelin [et al.]. – Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2022. – DOI : 10.1007/978-94-024-2172-9.
15. Sharkov E. A. Space experiment «Convergence»: scientific tasks, on-board equipment, methods for solving inverse problems / E. A. Sharkov, A. V. Kuzmin, S. Jeong. – DOI : 10.31857/S020596140002356-2 // *Exploration of the Earth from space*. – 2018. – No. 4. – P. 71–96.
16. Finke U. Detect and Locate Lightning Events from Geostationary Satellite Observations / U. Finke, O. Kreyer // *Report Part II: Possibility of lightning location from geostationary orbit, No. EUM/CO/02/1016/ SAT*; Institute für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover. – 2002. – URL : <https://studylib.net/doc/18778992/detect-and-locate-lightning-events-from-geostationary>.
17. Christian H. J. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the Earth Observing System / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, S. J. Goodman // *NASA Technical Memorial 4350*. – 1992. – URL : http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19920010794_1992010794.pdf.
18. The Optical Transient Detector (OTD) / H. J. Christian, K. T. Driscoll, S. J. Goodman [et al.] // *Proceedings of the 10th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Osaka, Japan, 1996. – P. 368–371.
19. Christian H. J. Optical Detection of Lightning from Space / H. J. Christian // *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Guntersville, Alabama, 1999. – P. 715–718.
20. Diurnal Lightning Distribution as Observed by the Optical Transient Detector (OTD) / R. J. Blakeslee, K. T. Driscoll, D. E. Buechler [et al.] // *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – Guntersville, Alabama, 1999. – P. 742–745.
21. The Lightning Imaging Sensor / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, S. J. Goodman [et al.] // *11th International Conference on Atmospheric Electricity*. – 1999. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/19990108789>.
22. *Global Lightning Observations*. – 39 p. – URL : <http://sprg.ssl.berkeley.edu/atmos/tgf/UCB-TGF.pdf>. – Text. Image : electronic.
23. GLM Lightning Cluster-Filter Algorithm / S. Goodman, D. Mach, W. Koshak [et al.]. – 2012. – 73 p. – URL : <https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/LCFA.pdf>. – Text. Image : electronic.
24. Christian H. J. The Need for Science-based Ground Processing Algorithms // *GLM Annual Science Team Meeting*. – Huntsville, Alabama, 2018. – URL : https://lightning.umd.edu/documents/glm/GLMScience2018/New%20Algorithms_Christian.pptx.
25. A novel CCD for application in high-frame rate geostationary space-based imaging / R. Bredthauer, K. Boggs, G. Bredthauer [et al.]. – DOI : 10.1117/12.925753 // *Proc. SPIE 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*. – 2012. – No. 84531N. – URL : https://www.researchgate.net/publication/258719592_A_Novel_CCD_for_Application_in_High_Frame_Rate_Geostationary_Space_Based_Imaging.

26. Cao D. Development and Evaluation of detection algorithm for FY-4 Geostationary Lightning Imager (GLI) measurement / D. Cao, F. Huang, X. Qie // XV International Conference on Atmospheric Electricity. – Norman, Oklahoma, USA, 2014. – URL : http://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Cao_59.pdf (date of application: 10.01.2024).
27. The Lightning Imager Feasibility for the Meteosat Third Generation / L. Tommasi, G. Basile, A. Romoli [et al.]. – DOI : 10.1117/12.2308211 // Proceedings of the 6th ICSO (International Conference on Space Optics). – Noordwijk, Netherlands, 2006. – URL : <https://hdl.handle.net/20.500.14243/63723>.
28. The EUMETSAT Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Applications and Product Processing / J. Grandell, U. Finke, S. Gigli [et al.] // 9th EMS Conference. – Toulouse, France, 2009. – 1 p. – URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EMS2009/EMS2009-551.pdf>.
29. Dobber M. Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) instrument on-ground and in-flight calibration / M. Dobber, S. Kox. – Darmstadt, Germany, 2016. – 31 p. – URL : <https://pdfs.semanticscholar.org/1f48/6720b1461e66e5293bc198b685f9f0c51aa6.pdf>.
30. Grandell J. Meteosat Third Generation (MTG): Lightning Imager and its products / J. Grandell ; EUMETSAT. – 2015. – URL : <https://resources.eumetrain.org/data/3/362/362.pdf>.
31. Layton L. NSF/NASA Firefly CubeSat To Study Link Between Lightning And Terrestrial Gamma Ray Flashes / L. Layton // Spacemart. – 2008. – URL : <http://www.nasa.gov/topics/universe/features/firefly.html>.
32. The NSF Firefly CubeSat Mission: Rideshare Mission to Study Energetic Electrons Produced by Lightning / D. Rowland, J. Hill, P. Uribe [et al.] // 2011 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, March 5–12, 2011, paper: 2.0403. – DOI : 10.1109/AERO.2011.5747231. – URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5747231>.
33. An update on the CubeSpark 3D Lightning Mapping Concept / P. Gatlin, T. Lang, M. Quick [et al.] // 2022 GLM Annual Science Team Meeting. – Huntsville, AL, USA, 2022. – URL : https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220013897/downloads/CubeSpark_update_GLM_Science_Meeting_Sept2022.pdf.
34. CubeSat Development for Lightning Flashes Detection: RaioSat Project / A. C. Julio Filho, A. Tikami, E. S. F. De Paula [et al.] // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2020. – Vol. 1. – P. 80-93. – DOI : <https://doi.org/10.5028/jatm.cab.1161>.
35. Christian H. J. Optical observations of lightning from a high altitude airplane / H. J. Christian, S. J. Goodman // Journal of Atmos. Oceanic Technol. – 1987. – Vol. 4. – P. 701–711.
36. Goodman S. J. A Comparison of the Optical Pulse Characteristics of Intracloud and Cloud-to-Ground Lightning as Observed above Clouds / S. J. Goodman, H. J. Christian // Journal of Applied Meteorology. – 1988. – Vol. 27. – No. 12. – P. 1369–1381.
37. Pohjola H. Meteosat Third Generation Lightning Imager (MTG-LI): Flash and Accumulated products and test data for user readiness activities / H. Pohjola, J. Grandell // Event Week on MTG-I satellite. – 2016. – URL : https://resources.eumetrain.org/data/4/433/Session_6.pdf.
38. Dobber M. Meteosat Third Generation (MTG) Lightning Imager (LI) instrument performance and calibration for user perspective / M. Dobber, J. Grandell // EUMETSAT. – 2014. – P. 1–13. – URL : <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1088&context=calcon>.
39. Kvitka V. E. Creation of a lightning detector for the International Space Station / V. E. Kvitka, A. V. Korkh // Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University. – 2018. – Vol. 66. – No. 1. – P. 42–49.
40. Development of a CubeSat-sized MCU – the experience of Bauman Moscow State Technical University / D. A. Rachkin, S. M. Tenenbaum, V. G. Melnikova [et al.] // K. E. Tsiolkovsky and the progress of science and technology in the XXI century. Materials of 56 scientific readings devoted to the development of scientific heritage and the development of K. E. Tsiolkovsky's ideas. – Kaluga. – 2021. – P. 24–27.

Aleksandr Alekseevich Astashkin, Candidate of technical sciences (Ph. D), Leading researcher, t. +7 (495) 513-55-87, e-mail: Astashkin@tsniimash.ru.

Aleksandr Vitalevich Karelin, Associate professor, Doctor of physics and mathematics (D. Sc.), Chief scientific officer, t. +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@tsniimash.ru.

Yury Aleksandrovich Kuzmin, Candidate of technical sciences (Ph. D), Head of sector, t. +7 (495) 513-40-88, e-mail: KuzminYA@tsniimash.ru.

Kirill Alekseevich Molodtsov, Engineer, t. +7 (495) 513-40-88, e-mail: MolodtsovKA@tsniimash.ru.

Vyacheslav Aleksandrovich Shuvalov, Candidate of technical sciences (Ph. D), Leading researcher, t. +7 (495) 513-49-45, e-mail: ShuvalovVA@tsniimash.ru.

Konstantin Sergeevich Shcherbatykh, Engineer, t. +7 (495) 513-48-61, e-mail: ShcherbatykhKS@tsniimash.ru.

Aleksandr Aleksandrovich Yakovlev, Candidate of technical sciences (Ph. D), Deputy head of the department, t. +7 (495) 513-47-44, e-mail: AAYakovlev@tsniimash.ru.

(Joint-Stock Company «Central Research Institute for Machine Building»).